

真空电弧熔炼的铜铬触头材料组织性能分析

梁永和, 张明江, 陈名勇

(桂林电器科学研究所, 广西 桂林 541004)

Structure and Property Analysis of Copper-chromium Contact Materials Melted with Vacuum Arc

LIANG Yong-he, ZHANG Ming-jiang, CHEN Ming-yong

(Guilin Electrical Equipment Scientific Research Institute, Guilin 541004, China)

摘要: 论述了铜铬触头的金相组织与形成机理, 金相组织对电气性能的影响及影响结晶组织的工艺因素, 阐明了电弧熔炼法铜铬触头材料具有铬在铜基体中呈均匀细小弥散分布的铜铬组织; 在开断能力、抗熔焊性、介质恢复强度等电气性能方面均明显优于传统粉末冶金法铜铬触头材料。

关键词: 真空电弧熔炼; 铜铬触头; 金相组织

中图分类号: TM241

文献标识码: A

Abstract: This paper describes the microstructure of copper-chromium contact and forming mechanism, the process factors affecting the crystallized structure as well as the influence of microstructure on electric properties. The copper-chromium contact melted with vacuum arc has the microstructure of homogeneous and fine chromium particles distributed dispersively in copper basis. The contact has many advantages in breaking capacity, anti-welding behaviour and dielectric recovery strength, compared with traditional powder metallurgy copper-chromium contact.

Key words: vacuum arc melting; copper-chromium contact; microstructure

1 引言

金属材料的性能是由其成分、组织和结构决定的。实际应用已经证明了铜铬仍是当前综合性能最好的真空断路器触头材料, 但是不同工艺方法制造的铜铬材料、具有不同组织结构的铜铬材料, 其性能差异很大。

通常触头经过几次大电流分断后具有更高的开断可靠性, 这一现象引发了专业技术人员研究用真空电弧熔炼的方法来制造铜铬触头材料的想法, 西门子公司实践证明了真空电弧熔炼工艺制造的铜铬触头材料性能的优越性和实际应用的可行性。

2 铜铬触头的金相组织与形成机理

大电流开断后的触头表面金相分析显示, 触头

表面是一层铬在铜中呈非常细小弥散分布的组织, 这层组织不同于开断前的原始组织, 厚度约 $150\ \mu\text{m}$, 铬颗粒大小约 $1\sim 5\ \mu\text{m}$, 见图 1, 图 2。分析认为, 开断大电流过程中电弧产生的高温使触头表面的铜铬发生了互溶反应, 熄弧后, 随着温度的下降, 触头表面铜铬溶液中的铬结晶, 从铜中过饱和析出, 而真空灭弧室导电系统良好的导热性为铜铬触头提供了很强的散热能力, 使铜铬溶液迅速冷凝, 形成了铬在铜中呈细小弥散分布的组织。



图1 10 kV, 40 kA 分断 30 次后的组织形貌 (70 \times)



图2 10 kV, 40 kA 分断 30 次后的组织形貌 (1400 \times)

因此, 除了通常采用的粉末冶金方法外, 冶炼的方法不仅可以制造铜铬材料, 而且可以获得铬在铜中呈细小弥散分布的铜铬组织: ①把铜和铬加热到铬的熔点 $1890\ \text{C}$ 以上使其熔化; ②凝固时为铜铬熔液提供足够快的冷却速度, 即可用冶炼的方法制造机械混合物组织的铜铬材料。这为真空电弧熔炼工艺制造铜铬触头材料提供了依据。

用粉末冶金方法制得铬颗粒非常细小 (约 $10\ \mu\text{m}$) 的铜铬触头材料, 需要使用粒度为 $10\ \mu\text{m}$ 以下的铬粉, 受制粉和超细粉末制品对工艺技术要求等的限制, 虽然理论上说是可能的, 但是由于制粉成本和材料制造工艺成本极高, 难以产业化和商业化。气体含量是真空断路器触头材料的一项重要技术指标。当用粉末冶金方法制造铜铬触头材料时, 要通过工艺过程去除原材料 (尤其是铬粉) 中的气体, 降低产品气体含量, 成本极高, 最终铜铬触头材料的气体含量主要取决于原材料铬粉 (和铜粉) 的气体含量; 而且, 粉末越细、比表面越大, 吸附的气体就越多, 用 $10\ \mu\text{m}$

左右的铬粉制造铜铬触头材料,常规的粉末冶金工艺和设备难以满足真空断路器对触头材料气体含量的要求。更重要的是,通过粉末冶金烧结或熔浸制成的材料组织结构与经过熔炼冷凝固形成的组织结构是有较大差异的,后者的性能明显要优于前者。

用冶炼的方法可以制造铬在铜中呈细小弥散分布的铜铬材料。由于真空断路器触头对铜铬材料的气体含量有较高的要求,而铬是亲氧性元素,因此铜铬触头材料不宜采用在空气中进行的普通冶炼方法制造。理论上可以使用特种冶金的真空电弧(自耗)熔炼、真空感应熔炼、电子束熔炼(电子轰击熔炼)等方法。实际操作中,由于铜和铬的蒸气压较高,难以解决高真空和电子枪污染问题,规模生产中不宜使用电子束熔炼。从技术上说,真空电弧自耗熔炼在规模生产中使用是可行的,铬颗粒平均粒度为 $10\sim 20\ \mu\text{m}$,在铜中呈均匀弥散分布,而且不论铬的含量是低于25%,还是高于50%^[1],但工艺设备造价较高。

从图3的铜铬相图上可以看出,温度在 $1900\ \text{C}$ 以上,铜和铬处于互溶(或混溶)状态, $1750\ \text{C}$ 时,液态铜中含有40%的铬,液态铬中含有5.5%的铜,随着温度的降低,铬在铜中的溶解度迅速下降,常温下几乎不固溶;而铜在铬中的溶解度为零;即常温下铜和铬既不形成固溶体,又不生成金属间化合物,是机械混合物组织。铜和铬的熔点和比重相差较大,铜的熔点为 $1083\ \text{C}$,比重为 $8.93\ \text{g/cm}^3$;铬的熔点为 $1890\ \text{C}$,比重为 $7.20\ \text{g/cm}^3$;这意味着铜铬材料用冶炼的方法制造,最重要的是解决偏析的问题。综合上述分析,根据金属结晶学的原理,把铜和铬加热到 $1900\ \text{C}$ 以上,使铜和铬充分互溶,提供良好的散热条件形成足够高的冷却速度,随着温度的下降,液态铬开始结晶,溶解在铜中的铬从铜中过饱和析出。冷却速度越高达到的过冷度也越大,在足够大的过冷度下,铜铬熔液迅速形成核结晶,使过饱和析出不能充分进行,从而形成致密的、铬在铜基体中呈细小弥散分布的、均匀的铜铬组织。

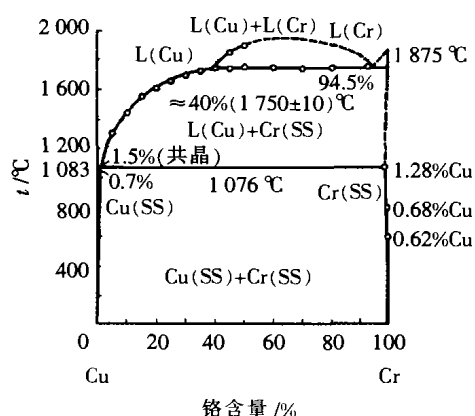


图3 铜铬二元相图

3 金相组织对电气性能的影响

触头材料是一种金属功能材料。在非纳米概念的范畴,当触头材料的结晶组织是假合金、机械混合物时,发挥和承担电接触功能的作用主要是靠触头材料组成元素本身的物理和化学性质,而理想的组织结构则能改善材料的性能,能更充分地发挥其有利的物理和化学性质的作用,同时抑制不利的物理和化学性质产生的影响。在触头材料研究中,首先要解决的两个问题是:①选择理想的组元和成分,②寻求理想的组织结构。其后才是如何实现理想的组元成分和组织结构,最终实现研究工作的目标。

由于铜和铬既不固溶,也不形成金属间化合物,使得铜铬材料不仅保持了铜和铬各自单一的特性,而且还保存着它们共同的特性。当铜铬材料用作真空断路器触头时,铜和铬的这些单一特性和共同特性承担着真空断路器触头的主要功能作用,也使其表现出比原先使用的铜中添加低熔点高蒸气压元素等其他触头材料更为优异的综合电气特性,即铜具有良好的导电和导热性能,是理想的触头材料组元(在真空下表现得更为突出),使铜铬材料具有承载和分断大电流的能力;铬具有较高的熔点和机械强度、低的截流水平和强的亲氧性,使铜铬材料具有耐电弧烧蚀、抗熔焊、截流水平低和介质强度恢复快等特性;最为难得的是,铜和铬具有相近的蒸气压,使得铜铬触头在真空电弧的作用下,表面的铜和铬蒸发和冷凝的速度相当,触头表面始终能基本保持其原有的成分^[2],触头不会因为经过多次分断后,表面成分发生变化而导致触头电气性能的变化。这对保证电器可靠性是非常重要的。

经过电弧熔炼的铜铬触头材料与粉末冶金方法制造的铜铬触头材料相比,结晶组织中夹杂的数量要少得多、颗粒要小得多,这些夹杂主要是金属氧化物,如氧化铝、氧化铬和氧化硅。在电弧熔炼过程中,制成自耗电极的铜和铬逐渐被熔化,铜铬铸锭随之长高,为了保证整个铸锭组织的均匀性,在熔炼过程中铸锭必须始终保持一段连续的熔池。由于金属氧化物的熔点高、比重小,铜和铬熔化后,金属氧化物会上浮,聚积在熔池的表面,随熔池移至铸锭的顶端,直到熔炼结束后而被切除;或被电弧吹到熔池边缘,冷凝在铸锭外圆表面而被去除;电弧熔炼的真空氛围还有利于铜和铬中低熔点高蒸气压元素的去除。可见,真空自耗熔炼有区域熔炼的提纯效果。采用粉末冶金工艺,烧结或熔浸温度要低于被烧结金属铜和铬或高温相铬的熔点,而且为了防止烧坏过烧变形或形成闭孔,一般烧结或熔浸的温度都不宜太高,时间不宜过长。在烧结或熔浸过程中,铜得不到熔化或得不到充分精炼;铬没有完全熔化,铬中的氧化铬和氧化铝等金属氧化物被保留在铜铬触头材

料中。如果这些金属氧化物处于触头表层,在分断大电流时,受电弧高温的作用,金属氧化物可能发生分解,造成局部放出气体,破坏局部的绝缘强度,降低开断性能。

由于制造铜铬触头材料使用的原材料铬粉通常是采用铝热法金属铬经机械破碎制成的,铬粉中氧化铝、氧化铬和氧化硅等氧化物的金属元素,或是主元素和共生元素,或是工艺添加元素,所以铜铬触头材料要做到完全除去这些金属氧化物是不现实的。因此,比较理想和现实的做法是:控制原材料中金属氧化物的数量和颗粒大小,并在制造过程中设法尽量去除和细碎金属氧化物,减少铜铬触头材料中金属氧化物的数量,尤其是要严格控制大颗粒金属氧化物的颗粒大小。

已有研究表明,铜铬触头中的铬颗粒的大小及均匀程度对真空断路器的耐压强度有影响。电击穿首先发生在耐压强度较弱的相上,对于铜铬触头材料而言,首次电击穿往往发生在铬相上,触头表面显微组织细化和成分均匀化能提高耐压强度^[3]。铬的导电和导热系数小于铜,铬和铜在承载和分断大电流时,所产生和随后散失热量的能力不同;铬比铜、大颗粒的铬比小颗粒的铬产生的热量多、导热能力差、局部温度高;因此,大颗粒铬和铬富集等不均匀铜铬结晶组织会造成铜铬触头表面局部受热不均匀,而加剧局部区域的热电子发射和放气,导致发生击穿,降低开断性能。通过熔炼、强制冷却制造的铜铬组织,铬颗粒已大大细化,减弱了铜铬触头表面局部受热不均匀;而且部分铬颗粒中存在过饱和的铜,不完全是纯铬。铜存在的过饱和改善了铬颗粒的导电和导热性能,可以提高铬颗粒的耐压强度^[4]。

熔焊经常使真空断路器开断失败,触头表面的铜和铬分布不均匀,过大面积的富铜区域容易发生熔焊。通过熔炼制造的,铬在铜中呈细小弥散均匀分布的铜铬触头表面有利于提高触头的抗熔焊性。因为铜和铬经过互溶(或混溶)、强制冷却而形成的铜铬组织,铬的弥散均匀分布使基体铜避免了大面积富集;而且基体铜已完全不是纯铜,而是铜铬合金。因为冷却过程是强制加速进行的,不是无限缓慢的平衡过程,所以铜中存在过饱和的铬。铜中存在过饱和和铬大大提高了铜的机械强度,进而改善触头的抗熔焊性能。

铬在铜基体中呈细小弥散均匀分布组织的铜铬触头具有更大的开断能力。在TD-12/1250-31.5小型化真空灭弧室中使用的是 $\phi 52$ 电弧法铜铬25,而同样规格的熔浸法铜铬50触头只应用在12kV,25kA的真空灭弧室中;在TD-14-12/1250-40AXQ小型化真空灭弧室中使用的是 $\phi 60$ 电弧法铜铬25,而同样规格的熔浸法铜铬50触头只应用在12kV,31.5kA

的真空断路器中。试验结果表明,配合小型化真空灭弧室和真空断路器,经过电弧熔炼的、铬在铜中呈细小弥散均匀分布的铜铬触头(图4)的开断能力比传统粉末冶金方法制造的铜铬触头(图5)的开断能力约高25%。它不仅可用作中压真空断路器触头,还可以用作低压真空断路器触头。

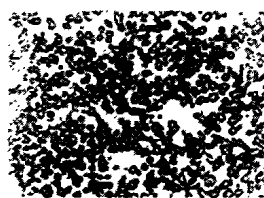


图4 电弧熔炼铜铬25的金相组织(100 \times)



图5 熔浸法铜铬50的金相组织(100 \times)

4 影响结晶组织的工艺因素

铜和铬的不固溶性使其成为了良好的真空断路器触头材料,同时也成为铜铬触头材料制造的最大难点。由于铜和铬不固溶,不能形成合金,而且它们的熔点和比重相差很大。根据传统的冶金学理论,通常只能采用粉末冶金的方法制造。所以铜铬触头材料自问世至20世纪80年代末,全世界均用粉末冶金的烧结工艺和熔浸工艺制造铜铬触头材料。受粉末冶金工艺方法的限制,其产品容易产生孔隙多、相对密度低等烧结缺陷或闭孔等熔浸缺陷,而这些工艺缺陷将影响真空断路器的电气性能(如开断能力、介质恢复强度等)和可靠性。电弧熔炼的方法制造铜铬触头材料可以克服粉末冶金工艺带来的孔隙多、相对密度低、闭孔等烧结缺陷和熔浸缺陷,但是如果熔炼参数控制不好,电弧熔炼工艺同样也会带来偏析、孔洞等铸造缺陷。电弧熔炼工艺参数是否合理,决定了是否能得到理想的铜铬结晶组织。

真空电弧熔炼铜铬触头材料所采用的电极是自耗的。铜和铬按照一定的比例制成自耗电电极,在自耗电电极和结晶坩埚之间加低电压、大电流,使其起弧。铜铬电极因通过大电流而产生电阻受热、电弧和熔池的热辐射、气体的对流等而熔化;熔化的铜铬熔液滴入水冷坩埚冷凝固。就熔炼工艺而言,铜铬铸锭组织的均匀程度和铬颗粒大小主要取决于电弧稳定性、熔池温度和冷却速度。

对真空电弧熔炼铜铬触头材料来说,控制电弧的稳定性非常重要,在熔炼的过程中如果电弧不稳定,会导致铜铬铸锭组织的不连续,产生孔洞、偏析等缺陷。在设定的工作电压和熔炼电流下,随着熔炼过程的进行,自耗电电极的长度逐渐熔化变短、自耗电电极的电阻及其产生的电压降不断变化,会影响电弧和熔炼电流的稳定性。而且这些因素在整个熔炼过程中不断变化又互相影响和制约,因此必须控制熔炼电流的稳定性,整个熔炼过程才能连续和稳定地

进行,从而获得没有缺陷的铜铬结晶组织。

熔炼电流的大小对铜铬铸锭组织的影响是很大的。熔炼电流过小,熔池的温度太低,铜铬熔液混熔不充分,而且可能有少量的铬得不到完全熔化,导致铜铬铸锭组织结晶不均匀,甚至存在原始的铬粉颗粒,见图6。熔炼电流过大,熔池的温度过高,熔炼速度太快,如果冷却速度得不到相应提高,铜铬熔液不能及时冷凝结晶,铬晶粒长大,在铜铬铸锭的组织中形成较粗大的、树枝状铬晶粒和孔洞、偏析等缺陷,见图7。



图6 电弧熔炼铜铬中原始的铬粉颗粒(100×)



图7 电弧熔炼铜铬中的铬树枝状铬晶粒(100×)

冷却条件与电弧稳定性、熔炼电流一样,是影响铜铬铸锭组织最重要的工艺因素之一,提高冷却能力对改善和优化铜铬铸锭组织、细化铜铬晶粒的效果是非常显著和至关重要的。真空电弧熔炼铜铬触头材料通常采用水冷的方式,提高水流速度,进而提高传热速度,对提高冷却能力是有效的。

5 结语

真空电弧熔炼工艺制造的铜铬触头材料具有铬在铜中呈细小弥散均匀分布的结晶组织,铬颗粒平均粒度为 $10\sim 20\ \mu\text{m}$,其开断能力、抗熔焊性、介质恢复强度等电气性能均明显优于用传统粉末冶金方法制造的铜铬触头材料。

真空电弧熔炼工艺制造的铜铬材料不仅可以用作中压真空断路器触头,还可以用作低压真空断路器触头。

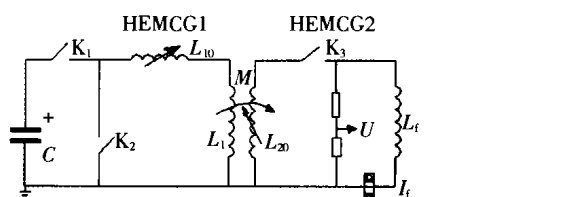
参考文献:

- [1] R Muller. Arc-melted CuCr Alloys as Contact Materials for Vacuum Interrupters [J]. Siemens Forsch.-u. Entwickl.-Ber. Bd., 1988, 17(3): 105-111.
- [2] H Kippenberg. Copper-chromium Contact Materials for Vacuum Circuit Breaker [A]. Proceedings of the 13th International Conference on Electric Contacts [C], Lausanne, Switzerland, 1986.
- [3] 丁秉钧.显微组织对 CuCr 真空触头材料耐电压强度的影响[J]. 电工合金, 1998(3): 11-16.
- [4] 修士新. CuCr 触头材料微观特性对其宏观性能的影响[J]. 高压电器, 2000, 36(3): 40-42.

作者简介:梁永和(1954-),男,教授级高工,主要从事电工合金技术方面的研究工作。

(上接第 190 页)

(2)爆磁压缩发生器动态高电压测量的原理见图6。试验时,电容器组 $C=220\ \mu\text{F}$,充电 $U_0=6\ \text{kV}$, $L_f=3.8\ \mu\text{H}$,测量的电压和电流波形见图7。



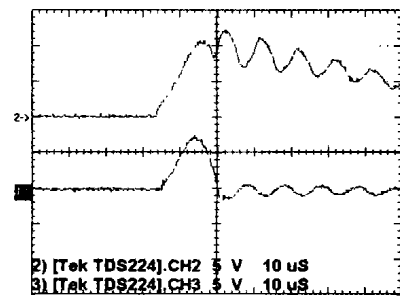
$L_{10}+L_1$ ——第1级HEMCG1的总电感 L_{20} ——第2级HEMCG2的总电感 L_f ——HEMCG2的负载 K_1 ——电容器组放电的炸药爆炸接通开关 K_2, K_3 ——HEMCG1, HEMCG2的撬断开关 I_{10} ——HEMCG1的初始电流 M ——HEMCG1和HEMCG2的互感 I_f ——负载电流测量 U ——负载电压

图6 爆磁压缩发生器动态试验测试示意图

由图7可看出: $u=di/dt$,所测电压波形与电流波形符合微分关系;波形光滑、无毛刺或大的突变;所测电压与电容器充电电压基本一致,说明分压器工作可靠、测量准确。

4 结论

爆磁压缩发生器的负载电压测量需要较长的信号线,且负载本身没有良好的接地。上述两种方法具



通道2——电流波形 通道3——电压波形

图7 爆磁压缩发生器动态试验测试电流和电压波形

有高输出阻抗的特点,且较好地解决了接地不良而引起的地干扰和破坏,满足了实验要求。由于爆磁压缩发生器造价较高,且只能一次运行,在实际实验中,同时运用两种方法进行测量可进一步提高测量的可靠性和准确性。

参考文献:

- [1] 王莹. 高功率脉冲电源[M]. 北京: 原子能出版社, 1991.
- [2] 杨津基. 冲击大电流技术[M]. 北京: 科学出版社, 1981.
- [3] 揭秉信. 大电流测量[M]. 北京: 机械工业出版社, 1987.

作者简介:曹胜光(1970-),男,硕士,从事脉冲功率技术研究。